TP 6: Effet Doppler

Objectifs : Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler.
Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas de faibles vitesses.
Utiliser des données spectrales et un logiciel pour illustrer l'effet Doppler en astrophysique.

I°) Mise en évidence de l'effet Doppler

Il est courant de constater une variation du son lorsqu'une source sonore se rapproche ou s'éloigne d'un observateur. Cette effet est appelé effet Doppler découvert par Christian Doppler en 1842. Ce phénomène affecte tous les phénomènes ondulatoires : ondes sonores, lumineuses, ondes à la surface de l'eau...

1°) Regarder et écouter la vidéo diffusée. Décrire précisément ce que vous entendez.

La variation de fréquence due à l'effet Doppler est donnée par les relations ci-dessous :

$$f_r = \frac{f_e}{1 \pm \frac{v_e}{c}}$$

+ si la source d'onde **s'*éloigne***.
- si la source d'onde ***se rapproche.***

Remarque : c est la célérité des ondes et v_e la vitesse de l'émetteur.
f_r est la fréquence reçue et f_e la fréquence émise.
Ces formules ne sont valables que si le déplacement est dans la direction du récepteur.

2°) Cette formule vérifie-elle vos observations précédentes ?

3°) Que se passe-t-il si $v_e = c$? Comment s'appelle ce phénomène ?

II°) Mesure directe de la vitesse d'une voiture

- Observer la vidéo : ***Voiture Doppler***.
On souhaite déterminer la vitesse de ce véhicule pour savoir s'il est en excès de vitesse. On ne connaît pas la fréquence d'émission f_e de son klaxon (fréquence au repos).

- Pour répondre aux questions suivantes, vous avez à votre disposition le logiciel ***Winoscillo*** qui peut faire une analyse spectrale du son émis par le klaxon. (Voir mode d'emploi)

1°) Proposer un protocole pour déterminer la vitesse de ce véhicule. Le mettre en œuvre après vérification par le professeur. ***Donnée*** : $c = 340\ m.s^{-1}$ (célérité du son)

2°) Le conducteur commet-il un excès de vitesse sur cette route qui est limité à ***50 mph*** ?
Donnée : *1 mph = 1 mile per hour* ; *1 mile = 1609 m*

3°) Quelle approximation avons nous faite pour l'utilisation de la formule ?

On souhaite vérifier la valeur de cette vitesse part un autre moyen. Pour cela on utilise la distance entre les poteaux électriques. Voici un document en anglais donnant quelques informations dessus.

Utility Pole, Description
The standard utility pole in the United States is about 40 ft (12 m) long and is buried about 6 ft (2 m) in the ground.[3] However, poles can reach heights of 120 ft (37 m) or more to satisfy clearance requirements. They are typically spaced about 125 ft (38 m) apart in urban areas, or about 300 ft (91 m) in rural areas, but distances vary widely based on terrain. Joint use poles are usually owned by one utility, which leases space on it for other cables. In the United States, the National Electrical Code, published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), sets the standards for construction and maintenance of utility poles and their equipment. Standards for wood preservative materials and wood preservation processes, along with test criteria, are in ANSI, ASTM, and AWPA specifications, and in GR-60, Generic Requirements for Wooden Utility Poles.

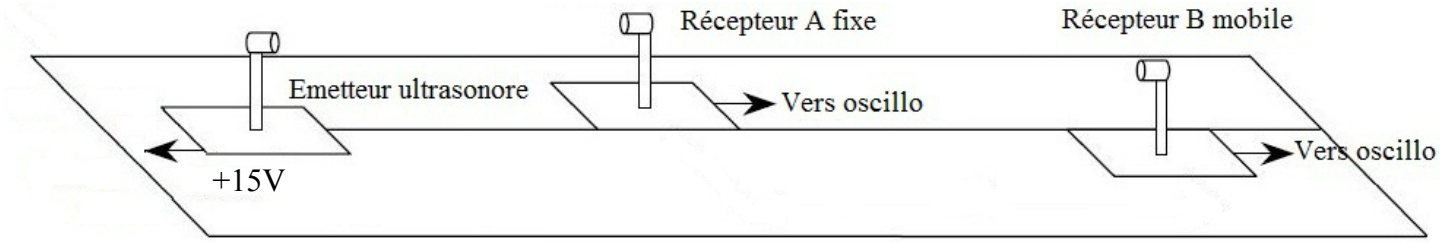
Article internet

4°) Grâce au document précèdent, et en utilisant le logiciel ***VirtualDub*** (pour lire le temps écoulé), calculer la vitesse de la voiture (apparemment elle sort d''une zone urbaine). Cette valeur est-elle concordante avec celle réalisée avec l'effet Doppler ?

III°) Mesure avec des ultrasons

Dans cette partie vous allez mesurer la vitesse d'un récepteur ultrasonore que ***vous bougerez à la main***.
La vitesse mise en jeu est alors faible (quelques dizaines de $cm.s^{-1}$), la différence de fréquence engendrée par l'effet Doppler est donc elle aussi faible, ce qui n'est pas facile à mesurer directement. Pour palier ce problème on combine [on additionne (vitesse faible) ou on multiplie (vitesse élevée) les signaux entre eux (principe du Radar)].

- Réaliser le montage suivant :



Nous allons ***additionner*** les signaux de la voie 1 et 2 de l'oscilloscope.
Pourquoi faire cela ? Voici un document traitant de la somme de 2 signaux sinusoïdaux de fréquences voisines.

Sommation de sinusoïdes de même amplitude et de fréquence voisines

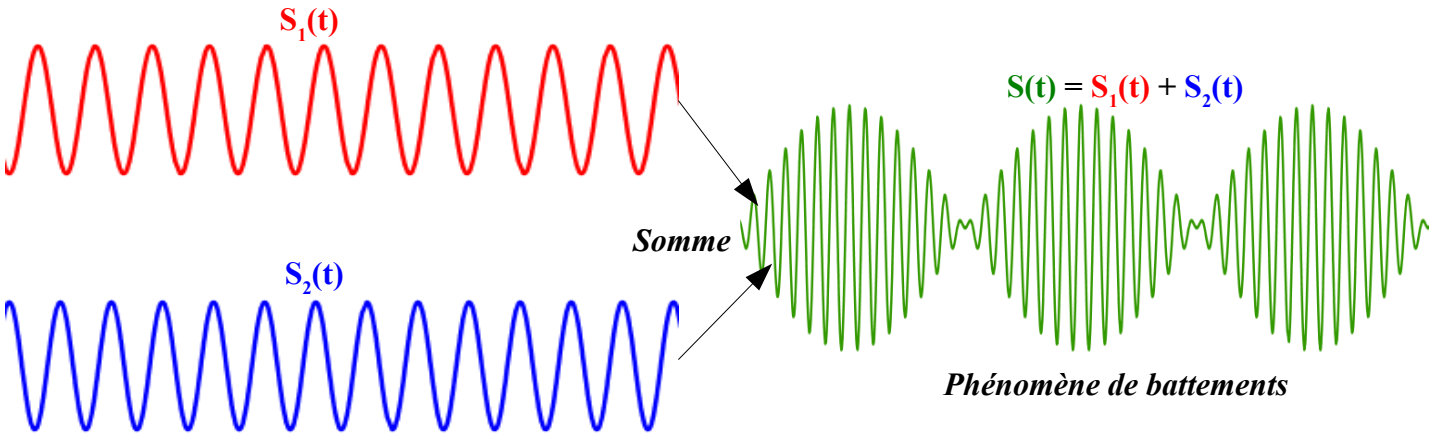
Soit un signal composé de la somme de deux sinusoïdes S_1 et S_2 de fréquence respective : f_1 et f_2

$$S(t) = S_1(t)+S_2(t) = A\cos(2\pi f_1 t)+A\cos(2\pi f_2 t)$$

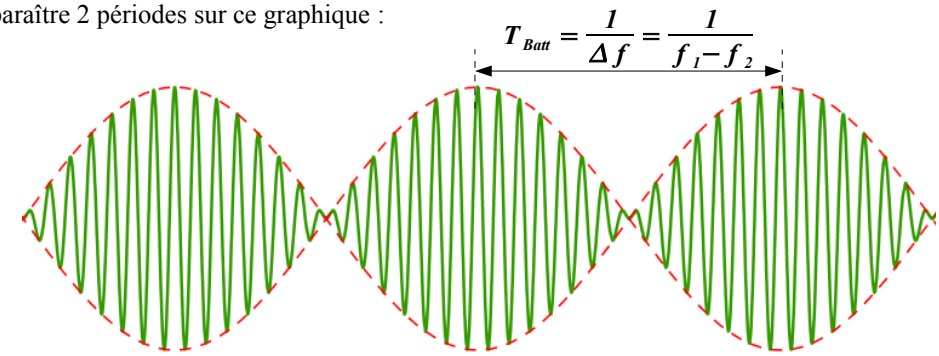
On sait (voir Trigonométrie) que $\cos(a)+\cos(b) = 2\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$

et donc si on applique cette relation à notre somme initiale, nous avons $S(t) = 2A\cos\left[\pi(f_1-f_2)t\right]\cos\left[\pi(f_1+f_2)t\right]$

Si les fréquences f_1 et f_2 ***<u>ne sont pas trop différentes</u>*** alors on voit apparaître graphiquement un phénomène de ***battements*** :



Clairement on voit apparaître 2 périodes sur ce graphique :



1°) Expliquez grâce à ce que vous venez de lire comment vous pouvez accéder à la vitesse de votre récepteur ultrasonore avec le matériel présent sur la paillasse.

2°) Réaliser votre expérience et en déduire la vitesse de déplacement de votre récepteur (à la main).
Conseil : utiliser une base de temps d'environ ***10 ms/div***.

3°) Vérifier cette valeur par une autre manière. Vous avez à votre disposition un chronomètre et un mètre ruban.

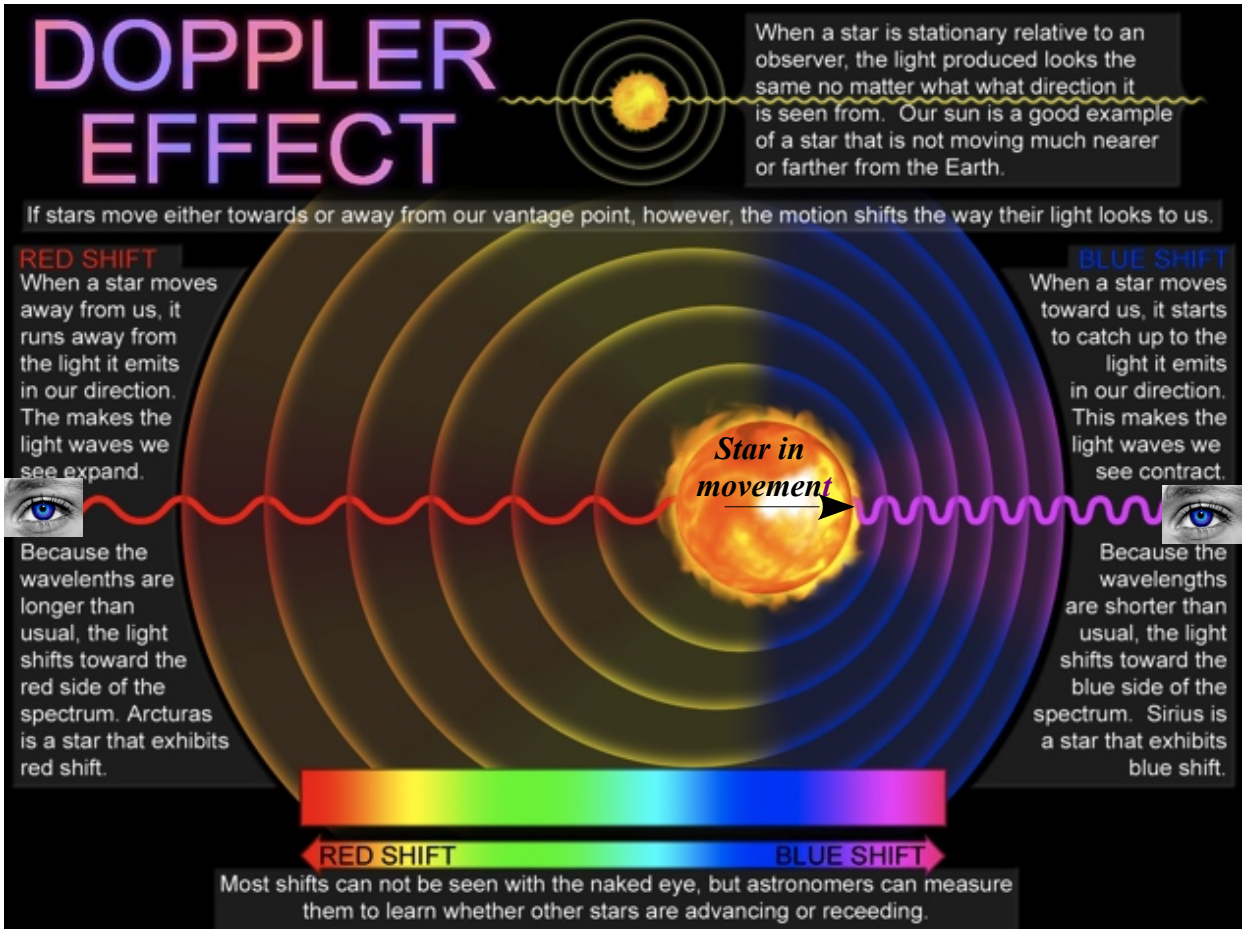
4°) Pourquoi sur l'oscilloscope la somme des 2 signaux ne ressemble pas tout à fait celui du document ?

IV°) L'effet Doppler en astronomie

a°) Théorie

1°) Quelle relation lie la fréquence f, la célérité c de l'onde et sa longueur d'onde λ ?

2°) Réécrire alors la relation du début avec les longueurs d'onde λ_r *et* λ_e . Annoter alors l'image ci-dessous que l'on rencontre souvent dans les explications sur l'effet Doppler.


DOPPLER EFFECT
When a star is stationary relative to an observer, the light produced looks the same no matter what what direction it is seen from. Our sun is a good example of a star that is not moving much nearer or farther from the Earth.
If stars move either towards or away from our vantage point, however, the motion shifts the way their light looks to us.
RED SHIFT
When a star moves away from us, it runs away from the light it emits in our direction. The makes the light waves we see expand.
BLUE SHIFT
When a star moves toward us, it starts to catch up to the light it emits in our direction. This makes the light waves we see contract.
Star in movement
Because the wavelenths are longer than usual, the light shifts toward the red side of the spectrum. Arcturas is a star that exhibits red shift.
Because the wavelengths are shorter than usual, the light shifts toward the blue side of the spectrum. Sirius is a star that exhibits blue shift.
RED SHIFT
BLUE SHIFT
Most shifts can not be seen with the naked eye, but astronomers can measure them to learn whether other stars are advancing or receeding.

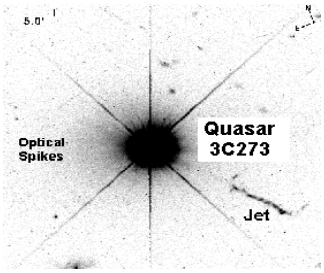
L'effet Doppler est utilisé en astrophysique pour déterminer la vitesse éloignement des galaxies (expansion de l'univers), la vitesse de rotation des astres ou encore la détection d'exoplanètes...

Pour cela il suffit de repérer les raies d'absorption ou d'émission sur le spectre de l'objet lumineux que l'on étudie et de les comparer aux spectres de référence que nous connaissons sur Terre.

3°) Si l'objet s'éloigne, les raies d'absorption se décalent vers quelle couleur ? Justifier.
Même question si l'objet se rapproche. Justifier.

4°) De la formule précédente, en déduire une relation permettant de mesurer la vitesse v_e de l'émetteur en fonction du décalage spectral $\Delta\lambda = \lambda_r - \lambda_e$ et de la fréquence λ_e.

b°) Redshift et distance du quasar 3C273

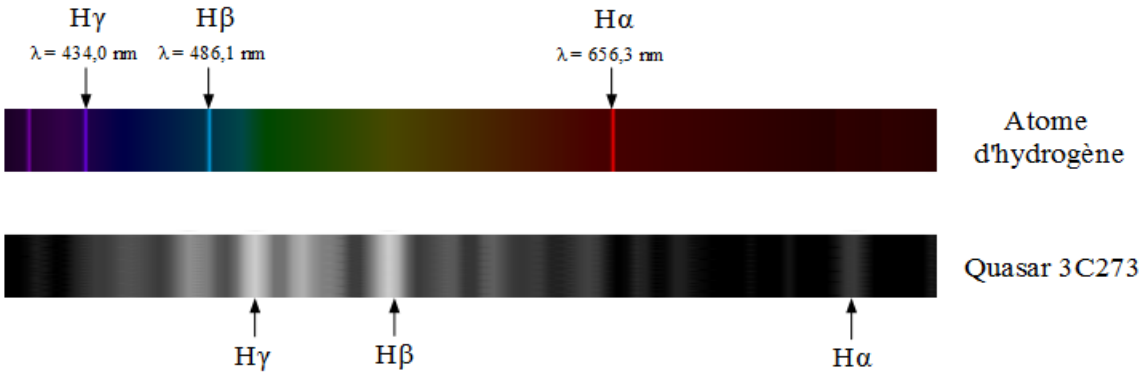


Un quasar (quasi stellar object), est une galaxie très lumineuse avec sûrement un trou noir placé en son centre qui dévore des étoiles qui passe dans son environnement.

En 1963, des astronomes ont publié un article dans la revue Nature expliquant que 3C 273 était un objet extrêmement lointain, avec un ***décalage vers le rouge*** le plaçant à plusieurs milliards d'années-lumière.

Dans la suite vous allez, déterminer la vitesse de récession de ce quasar et en déduire sa distance grâce à la loi de Hubble.

On donne ci-dessous, le spectre de cet objet ainsi que celui du spectre de l'atome d'hydrogène obtenu sur Terre. Certaine raies d'émission de l'atome d'hydrogène possèdent des noms particulier : Hα, Hβ ...



1°) Quel est l'utilité du spectre de l'atome d'hydrogène ?

2°) Les anglais appellent le décalage de raies pour ce quasar ***redshift***, expliquer pourquoi ? La source lumineuse se rapproche-t-elle ou s'éloigne-t-elle ?

2°) Mesurer la longueur d'onde λ_r de la raie décalée de Hα et en déduire le décalage spectral $\Delta\lambda = \lambda_r - \lambda_e$.

3°) En déduire alors la valeur v_e d'éloignement de ce quasar.
Donnée : célérité de la lumière $c = 3{,}0 \times 10^5\ km.s^{-1}$

4°) Le redshift noté z est défini par $z = \dfrac{\Delta\lambda}{\lambda_e} = \dfrac{\lambda_r - \lambda_e}{\lambda_e}$. Calculer le redshift pour ce quasar.

5°) L'astronome américain Edwin Powell Hubble, a montré en 1929 que la vitesse d'éloignement v_e des galaxies est proportionnelle à leur distance d. D'où la relation célèbre :

$$v_e = H \times d \quad \textit{avec } H = \textit{constante de Hubble}$$

6°) Évaluer la distance du quasar précédent en Mpc (Méga parsecs) puis en année lumière (voir remarques).
Donnée : H = 70 $km.s^{-1}.Mpc^{-1}$

Remarque 1: 1 pc = 1 parsec = parallaxe 1 " = la distance à laquelle on observerait le rayon Terre – Soleil sous un angle de 1" d'arc (1 seconde d'arc). Après calcul trigonométrique simple on trouve que cette distance vaut 3,26 a.l (année lumière). 1° = 3600".

Remarque 2: la constante de Hubble évalue l'expansion de l'univers, c'est à dire le grossissement de l'espace. H = 70 $km.s^{-1}.Mpc^{-1}$ signifie qu'un cube de 1 Mpc de coté grandie de 70 km par seconde (ou encore qu'un cube de 1 km de coté grandit de 72 nm par an).

7°) Évaluer l'incertitude sur la longueur d'onde reçue $U(\lambda_r)$.

Données: $U_{simple\ lecture} = 2 \times \frac{1\ graduation}{\sqrt{12}}$ et $U_{double\ lecture} = \sqrt{2} \times U_{double\ lecture}$

8°) En déduire l'incertitude sur la vitesse $U(v_e)$ sachant que $\frac{U(v_e)}{v_e} = \frac{U(\lambda_r)}{\lambda_r - \lambda_e}$. (L'incertitude sur λ_e est négligeable).

9°) En déduire l'incertitude sur la distance $U(d)$ sachant que $\left(\frac{U(d)}{d}\right)^2 = \left(\frac{U(v_e)}{v_e}\right)^2 + \left(\frac{U(H)}{H}\right)^2$.

Donnée : $U(H) = \pm\, 3\, km.s^{-1}.Mpc^{-1}$

10°) La plus grosse imprécision dans le calcul de la distance provient de quel paramètre ?

Matériel nécessaire

-Vidéo voiture Doppler
-2 enceintes (pour faire écouter le phénomène de battements)
- PC équipé des logiciels Winoscillo + VirtualDub
- émetteur et 2 récepteurs ultrasonore
- Oscilloscope
- Des fils de connexions